

**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ**

УДК 621.3

Е. И. Сокол, д-р техн. наук, член-кор. НАН Украины

Г. Г. Жемеров, д-р техн. наук

И. Ф. Домнин, д-р техн. наук

Н. А. Ильина, д-р техн. наук

О. В. Ильина, канд. техн. наук

Д. С. Крылов, канд. техн. наук

О. И. Холод, канд. техн. наук

И. О. Лобач

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков

Д. В. Тугай, канд. техн. наук, e-mail: [tugaydv@yandex.ua](mailto:tugaydv@yandex.ua)

Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова, г. Харьков

**ОБЗОР НАУЧНЫХ РАЗРАБОТОК КАФЕДРЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ И БИМЕДИЦИНСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА «ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ» В ОБЛАСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ (Часть 1)**

*Представлен обзор основных научных работ кафедры промышленной и биомедицинской электроники НТУ «ХПИ» в области электромагнитной совместимости преобразовательных систем и энергосбережения: компенсированный управляемый выпрямитель, теория мгновенной активной и реактивной мощностей, преобразование координат пространственных векторов напряжений и токов, расчет потерь энергии и КПД в системе электроснабжения и практическое применения результатов научно-исследовательских работ. В данной статье приведена первая часть обзора научных работ кафедры. Библ. 35, рис. 6, табл. 2.*

*Ключевые слова: система электроснабжения, коэффициент полезного действия, компенсированный выпрямитель, теория мощности, силовой активный фильтр, активный выпрямитель, компенсированная асинхронная машина, распределенное производство электроэнергии.*

*Представлений огляд основних наукових робіт кафедри промислової і біомедицинської електроніки НТУ «ХПІ» в області електромагнітної сумісності перетворювальних систем та енергозбереження: компенсований керований випрямляч, теорія миттєвої активної та реактивної потужності, перетворювання координат просторових векторів напруг і струмів, розрахунок втрат енергії і ККД в системі електропостачання і практичне застосування результатів науково-дослідних робіт. В статті наведено перша частина огляду основних наукових робіт кафедри. Бібл. 35, рис. 6, табл. 2.*

*Ключові слова: система електропостачання, коефіцієнт корисної дії, компенсований випрямляч, теорія потужності, силовий активний фільтр, активний випрямляч, компенсована асинхронна машина, розподілене виробництво електроенергії*

**Введение**

Начиная со второй половины 1990х годов по настоящее время кафедрой промышленной и биомедицинской электроники (ПБМЭ) Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (НТУ «ХПИ») проводились интенсивные исследования возможностей повышения энергоэффективности и улучшения электромагнитной совместимости преобразовательных систем с различными типами преобразователей, с силовыми активными фильтрами и накопителями энергии. Теоретические исследования сочетались с разработкой большого числа компьютерных

моделей, на которых были выполнены виртуальные эксперименты, позволившие подтвердить выводы о высокой эффективности применения современных преобразователей и накопителей энергии, управляемых в соответствии с теорией мгновенных активной и реактивной мощностей, предложенной в работах Н. Akagi et. el. [1,2], и получившей развитие в [3–20].

В настоящей обзорной работе приведены основные результаты исследований, полученные сотрудниками кафедры ПБМЭ за последние 15 лет, большая часть из которых была опубликована ранее, в том числе аспирантами, успешно защитившими кандидатские диссертации и продолжавшими исследования после защиты. Результаты научно-исследовательских работ изложены в хронологическом порядке.

### Компенсированный управляемый выпрямитель (КУВ)

Несмотря на опубликование в 1983-1984 годах революционных идей в области теории мгновенных активной и реактивной мощностей японскими учеными Н. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabue [1, 2], во второй половине 1990х годов на кафедре ПБМЭ, как и в ряде других научных коллективов электротехников бывшего СССР, господствовали представления об электромагнитных процессах в преобразовательных системах, основанные на теории мощности О. А. Маевского [21], предложившего раскладывать полную мощность, вычисленную в периоде повторяемости сетевого тока, на четыре составляющие

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2 + H^2}, \quad (1)$$

где  $P$ ,  $Q$ ,  $T$ ,  $H$  – соответственно, мощности активная, реактивная, искажения и несимметрии.

Разложение О.А. Маевского (1), в котором средняя за период повторяемости скорость передачи энергии  $P$  из сети в нагрузку или в обратном направлении, то есть, величина, отражающая процесс передачи энергии в преобразовательной системе, суммировалась с чисто расчетными величинами  $S$ ,  $Q$ ,  $T$ ,  $H$ , не определявшие ни количества, ни скорости

передаваемой энергии. В ходу были такие сейчас малопонятные термины как «поток мощности», «мгновенная выдаваемая мощность» [22], ведомые сетью преобразователи «потребляли реактивную мощность из сети» или «генерировали реактивную мощность в сеть».

Усилия разработчиков были направлены, в основном, на создание преобразователей с синусоидальными сетевыми фазными токами, совпадающими или противоположными по фазе с фазными напряжениями сети. Современный уровень развития силовой электроники позволяет реализовать различные конкурентоспособные схемы ведомых сетью преобразователей с близким к единице коэффициентом мощности (ПЕКМ), удовлетворяющие требованиям стандартов к электромагнитной совместимости преобразователей с питающей сетью.

Кафедрой ПБМЭ был предложен компенсированный управляемый выпрямитель [23]. Одна из перспективных двенадцатипульсных схем ПЕКМ представлена на рис. 1. В этой схеме заданная величина реактивной мощности

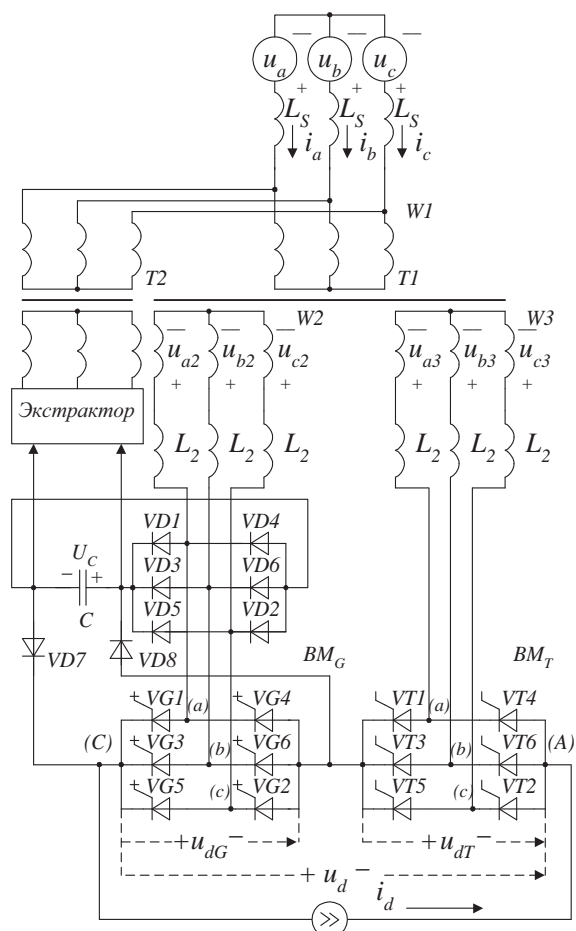


Рис. 1. Схема двенадцатипульсного КУВ

поддерживается за счёт того, что вентильный мост на тиристорах  $ВМ_T$  работает с положительными (отстающими) углами управления  $\alpha_T$ , а вентильный мост на GTO  $ВМ_G$  – с отрицательными (опережающими) углами управления  $\alpha_G$ . Изменяя величины  $\alpha_T$  и  $\alpha_G$ , можно регулировать расчетную реактивную мощность на стороне сети  $Q$ , в том числе при работе в режиме полной компенсации поддерживать её нулевое значение  $Q = 0$  во всём диапазоне регулирования величины выходного напряжения  $U_d$ .

Экстрактор, совместно с диодами VD1-VD8, выводит в питающую сеть коммутационную энергию моста на GTO  $ВМ_G$ . Его целесообразно выполнить по схеме силового активного фильтра, подавляющего также высшие гармоники в сетевом токе.

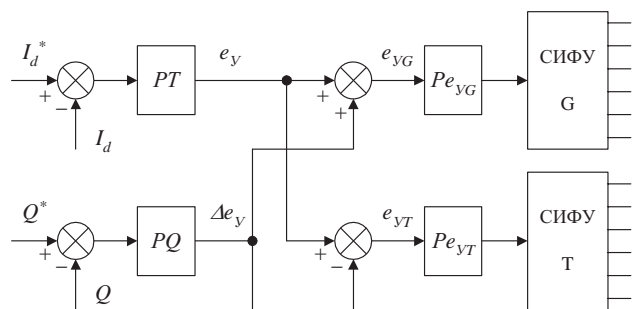


Рис. 2. Функциональная схема системы управления КУВ

Поддержание нулевого или конечного значения расчетной реактивной мощности может быть реализовано с помощью системы управления, функциональная схема которой представлена на рис. 2.

На вход системы управления подаётся сигнал задания тока нагрузки  $I_d^*$ , который сравнивается с сигналом обратной связи  $I_d$ , поступающим от датчика тока нагрузки. Разностный сигнал поступает на

вход регулятора тока  $PT$ , который формирует сигнал напряжения управления  $e_y$ . Для обеспечения регулирования величины и знака реактивной мощности на входе КУВ, на второй вход системы управления подаётся сигнал задания реактивной мощности  $Q^*$ , который сравнивается с сигналом обратной связи  $Q$ , поступающим от датчика реактивной мощности питающей сети. Разностный сигнал поступает на регулятор расчетной реактивной мощности  $PQ$ , формирующий дополнительный сигнал управляющего напряжения  $\Delta e_y$ , который суммируется с выходным сигналом  $PT$ . Суммарные сигналы управления  $e_{yG}$  и  $e_{yT}$  поступают на входы регуляторов напряжения управления  $Pe_{yT}$  и  $Pe_{yG}$  и далее – на входы систем импульсно-фазового управления двух вентильных мостов СИФУ<sub>G</sub> и СИФУ<sub>T</sub> соответственно. Так как вентильный мост на GTO тиристорах работает с отрицательными углами управления, а вентильный мост на тиристорах – с положительными, дополнительный сигнал  $\Delta e_y$  поступает на входы регуляторов углов управления  $Pe_{yT}$  и  $Pe_{yG}$  с противоположными знаками. При этом в режиме полной компенсации реактивной мощности система управления автоматически поддерживает равные по величине и противоположные по знаку углы сдвига основных гармоник двух составляющих фазного сетевого тока, создаваемых вентильными мостами КУВ, относительно фазного напряжения сети. При  $Q \neq 0$  система управления поддерживает заданную величину разбаланса углов сдвига основных гармоник тока.

При анализе КУВ принимают следующие допущения [35]: коммутации тока в двух мостах происходят по линейному закону и независимо друг от друга; ток нагрузки  $I_d$  идеально сглажен; напряжение на конденсаторе  $C$  (см. рис. 1) неизменно ( $U_C = \text{Const}$ ).

С учётом этих допущений, при полной компенсации реактивной мощности основные гармоники токов сети мостов на GTO и на однооперационных тиристорах равны по величине и сдвинуты по фазе на равные по модулю и противоположные по знаку углы относительно фазного напряжения питающей сети  $U_{1\phi}$ . Соответствующая векторная диаграмма представлена на рис. 3, а. Рассмотрим более подробно работу регулятора реактивной мощности для этого случая.

В случае отсутствия регулятора реактивной мощности  $PQ$  (см. рис. 2), с опорными напряжениями СИФУ обоих мостов сравнивается один и тот же сигнал управления  $e_y$ , как показано на рис. 3, б. Поэтому углы управления  $\alpha_T'$  и  $\alpha_G'$  равны по величине и противоположны по знаку (см. рис. 3, в). При этом вектор основной гармоники суммарного тока двух мостов  $I_{1\Sigma}'$  (см. рис. 3, а) смещается в сторону отставания относительно фазного напряжения питающей сети  $U_{1\phi}$  на угол  $\varphi'$ , который можно определить, как:

$$\varphi' = \varphi_T' - |\varphi_G'|, \quad (2)$$

где  $\alpha_T'$  – угол сдвига основной гармоники сетевого тока в мосте на тиристорах, равный

$$\varphi_T' = \alpha_T' + \frac{\gamma_T}{2}, \quad (3)$$

а  $\alpha_G'$  – угол сдвига основной гармоники сетевого тока в мосте на ГТО, равный

$$|\varphi_G'| = |\alpha_G'| - \frac{\gamma_G}{2}. \quad (4)$$

При  $Q^* = 0$  регулятор  $PQ$  (см. рис. 2) компенсирует угол отставания вектора сетевого тока, вырабатывая сигнал  $\Delta e_y$ , уменьшающий напряжение управления на входе моста на ГТО и увеличивающий напряжение управления моста на однооперационных тиристорах (см. рис. 3, б, в). Таким образом, в режиме полной компенсации реактивной мощности модуль угла управления моста на ГТО тиристорах  $|\alpha_G|$  будет всегда больше угла управления  $\alpha_T$  моста на однооперационных тиристорах. Нетрудно убедиться в том, что при полной компенсации реактивной мощности ( $Q^* = 0$ ) величины углов управления и коммутации тока вентилей должны соответствовать соотношению:

$$|\alpha_G| - \frac{\gamma_G}{2} = \alpha_T + \frac{\gamma_T}{2}, \quad (5)$$

где  $\gamma_T$ ,  $\gamma_G$  – соответственно, углы коммутации тока в вентильных группах на однооперационных тиристорах и на полностью управляемых вентилях.

При этом углы  $\alpha_T$  и  $\alpha_G$ ,  $\gamma_T$  и  $\gamma_G$  связаны между собой следующими выражениями:

$$\cos \alpha_G - \cos(\alpha_G + \gamma_G) + \gamma_G U_{C^*} = e_K I_{d^*}, \quad (6)$$

$$\cos \alpha_T - \cos(\alpha_T + \gamma_T) = e_K I_{d^*}. \quad (7)$$

Таким образом, используя принцип, описанный выше, можно добиться поддержания требуемого уровня выходного напряжения КУВ во всём диапазоне регулирования при полной компенсации реактивной мощности на стороне питающей сети. При необходимости поддержания ненулевого значения реактивной мощности на стороне питающей сети придётся ограничить диапазон регулирования выходного напряжения КУВ. Параметрическим законом поддержания нулевого значения реактивной мощности на входе КУВ является выражение (5), используя которое можно проводить исследования характеристик схемы, представленной на рис. 1, в режиме полной компенсации реактивной мощности. Отметим также, что структурная схема системы управления КУВ, представленная на рис. 2 может быть использована и с другими схемами КУВ.

Описанный выше принцип работы КУВ многократно проверен на компьютерных моделях. На рис. 4 представлены машинограммы выпрямленного напряжения двенадцатипульсового КУВ при конечных значениях углов коммутации тока.

В настоящее время КУВ может конкурировать с другими типами управляемых выпрямителей и преобразовательных систем в тех случаях, когда требуется широкий диапазон

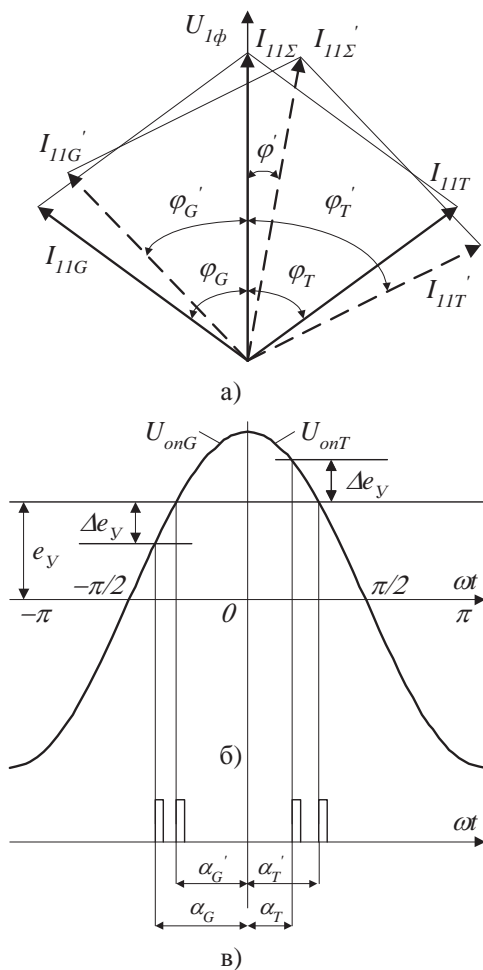


Рис. 3. Пояснение работы системы управления КУВ



регулирования выпрямленного напряжения и близкая к синусоиде форма сетевого тока.

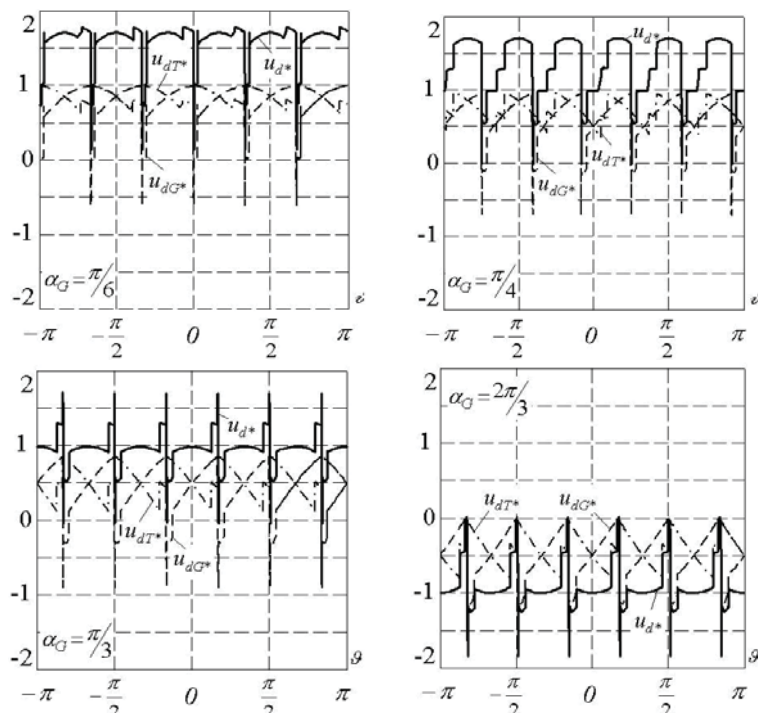


Рис. 4. Выпрямленное напряжение двенадцатипульсного КУВ при разных  $\alpha_G$

## Теория мгновенных активной и реактивной мощностей

Первые работы кафедры ПБМЭ посвященные теории мгновенных активной и реактивной мощностей, носившие, в основном, обзорный характер, были опубликованы в 2004 году [11, 12], хотя сама теория мощности использовалась при синтезе системы автоматического управления силовым активным фильтром (САФ), описанным в составе КУВ, запатентованного в Украине в 2002 году [23].

В последующие годы были опубликованы работы кафедры [13-20, 24, 25], развившие и уточнившие некоторые положения теории, вместе с другими многочисленными

публикациями [3, 9, 31-34].

В настоящее время можно считать общепринятыми следующие положения теории мгновенной мощности:

– В качестве эталонной теорией рассматривается трехфазная трехпроводная или четырехпроводная система электроснабжения (СЭ) с трехфазным симметричным источником синусоидальных напряжений и произвольной нагрузкой (линейной, активной, реактивной, смешанной, нелинейной, симметричной, несимметричной). Однофазная СЭ рассматривается как трехфазная с бесконечно большим омическим сопротивлением в двух из трех фаз.

– Электромагнитные процессы в СЭ описываются траекториями обобщенных векторов напряжения и тока в пространственной неподвижной либо вращающейся декартовой системе координат:

$$\vec{u}_s = \vec{i} u_a + \vec{j} u_b + \vec{k} u_c, \quad (8)$$

$$\vec{i}_s = \vec{i} i_a + \vec{j} i_b + \vec{k} i_c, \quad (9)$$

где  $\vec{u}_s, \vec{i}_s$  – соответственно пространственные векторы напряжения и тока трехфазной СЭ;

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  – орты по осям  $a, b, c$  системы координат;

$u_a, u_b, u_c$  – соответственно мгновенные напряжения фаз  $a, b, c$ ;

$i_a, i_b, i_c$  – соответственно мгновенные токи фаз  $a, b, c$ .

– Мгновенная активная мощность, иначе, мгновенная скорость потока энергии в СЭ, равна скалярному произведению пространственных векторов напряжения и тока

$$p = \vec{u}_s \vec{i}_s = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c. \quad (10)$$

– Вектор мгновенной реактивной мощности  $\vec{q}$  определяется как векторное произведение векторов напряжения и тока

$$\vec{q} = \vec{u}_s \times \vec{i}_s, \quad (11)$$

модуль этого вектора равен

$$|\vec{q}| = \sqrt{\left| \begin{matrix} u_{sb} & u_{sc} \\ i_{sb} & i_{sc} \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} u_{sc} & u_{sa} \\ i_{sc} & i_{sa} \end{matrix} \right|^2 + \left| \begin{matrix} u_{sa} & u_{sb} \\ i_{sa} & i_{sb} \end{matrix} \right|^2}. \quad (12)$$

– Если в период повторяемости процессов выполняется условие  $p = \text{const}$ ,  $|\vec{q}| = 0$ , СЭ работает с минимальными потерями энергии, равными сумме потерь в линии, соединяющей источник и нагрузку, и в силовом активном фильтре, подключенном параллельно нагрузке.

– Подключенный параллельно нагрузке активный компенсатор, состоящий из силового активного фильтра и конденсаторного накопителя энергии, должен иметь собственные внутренние потери энергии, меньшие чем разность потерь энергии в преобразовательной системе до подключения компенсатора и потерь энергии после подключения компенсатора.

– Трехфазная батарея конденсаторов или трехфазная батарея реакторов, будучи подключенной к трехфазной симметричной сети переменного синусоидального напряжения, схема представлена на рис. 5, не обменивается с сетью энергией, так как мгновенная активная мощность трехфазной сети тождественно равна нулю, а энергия, накопленная в трехфазной батарее конденсаторов и в трехфазном реакторе, не изменяется во времени:

$$E_{\text{cond}} = CU_{s\text{max}}^2 = \text{const}, \quad (13)$$

$$E_{\text{react}} = LI_{s\text{max}}^2 = \text{const}. \quad (14)$$

#### Преобразования координат пространственных векторов напряжений и токов

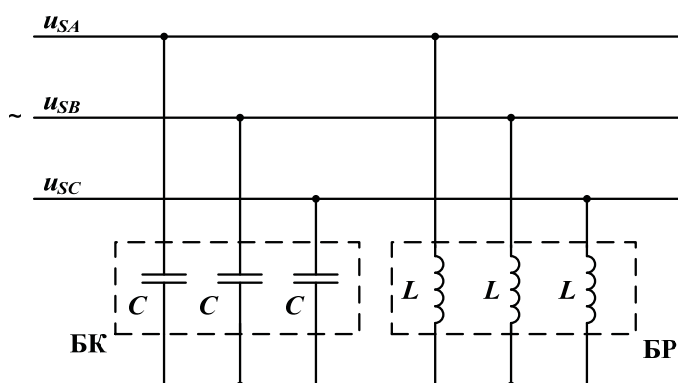


Рис. 5. Подключение к сети трехфазных батарей конденсаторов и реакторов

В теории мгновенных активной и реактивной мощностей для описания электромагнитных процессов и для синтеза систем управления силовым активным фильтром и активным выпрямителем используются преобразования координат пространственных векторов напряжений и токов. Если в теории электрических машин переменного тока рассматриваются, как правило, симметричные трехфазные трехпроводные СЭ, для анализа которых достаточно

перехода от неподвижной плоской трехфазной системы координат  $ABC$  к вращающейся плоской системе координат  $dq$ , то в теории мощности, имеющей дело с асимметричными трехфазными трехпроводными и четырехпроводными СЭ необходимо рассматривать результирующие векторы в пространственных системах координат  $abc$ ,  $\alpha\beta 0$ ,  $dq 0$  или  $pqr$ .

При синтезе систем управления САФ наибольший эффект дает переход от пространственной неподвижной декартовой системы координат  $abc$  к вращающейся пространственной декартовой системе координат  $pqr$ , в которой ось  $p$  направлена по пространственному вектору напряжения. Такая ориентация оси  $p$  позволяет создать два независимых друг от друга контура регулирования реактивных мощностей по ортогональным осям  $q$  и  $r$ . Отметим еще раз, что реактивная мощность это расчетная величина, которая, однако, может контролироваться системой управления.

Кафедрой ПБМЭ издано справочное пособие [26], в котором приведены однотипные по форме записи формулы для 26 преобразований в трех плоских и в пяти пространственных системах координат.

Предложено модернизированное преобразование Park [27] взамен преобразованию Park в известном виде [28-30] корректного для трехфазных симметричных СЭ без нулевого провода и, следовательно, для анализа переходных процессов в машинах переменного тока,

но имеющего неточность при анализе трехфазных четырехпроводных СЭ с асимметричной нагрузкой [27].

На рис. 6 приведены номера всех возможных преобразований координат в трех плоских ( $ABC$ ,  $\alpha\beta$ ,  $dq$ ) и в пяти пространственных ( $abc$ ,  $\alpha\beta 0$ ,  $dq0$ ,  $pqr$ ,  $a'b'c'$ ) системах координат, имеющих начало в одной и той же точке. Системы координат  $ABC$ ,  $\alpha\beta$ ,  $abc$ ,  $\alpha\beta 0$  – неподвижные, а системы координат  $dq$ ,  $dq0$ ,  $pqr$ ,  $a'b'c'$  – вращающиеся.

В качестве примера приведем формулы для преобразования из  $abc$  в  $pqr$ , полученные вторым из трех способов, указанных в [26]:

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_q \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_2 & \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_2 & \sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 + \frac{2\pi}{3} \right) \cos \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta_2 \\ -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \theta_1 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \left( \theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sqrt{\frac{2}{3}} \sin \left( \theta_1 + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos \theta_1 \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \theta_2 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 - \frac{2\pi}{3} \right) \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \theta_2 & -\sqrt{\frac{2}{3}} \cos \left( \theta_1 + \frac{2\pi}{3} \right) \sin \theta_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \theta_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где

$$\theta_1 = \arctg \frac{u_\beta}{u_\alpha}, \quad (16)$$

$$\theta_2 = \arctg \frac{u_0}{u_{\alpha\beta}}, \quad (17)$$

$$u_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} (u_a + u_b + u_c), \quad (18)$$

$$u_{\alpha\beta} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}. \quad (19)$$

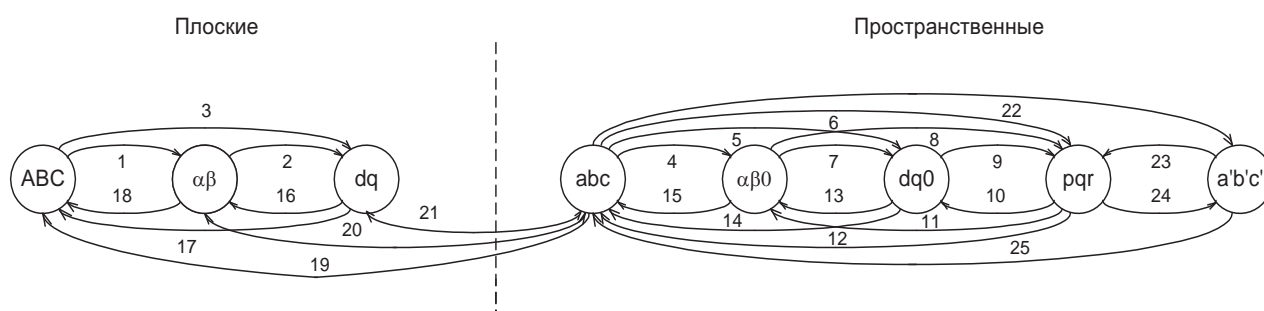


Рис. 6. Возможные преобразования координат

### Расчет потерь энергии и КПД в системе электроснабжения

Величина потерь при передаче в заданном интервале времени заданного количества энергии от источника в нагрузку является характеристикой энергоэффективности СЭ. Эта же характеристика может определяться в относительных единицах как коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{\int_{t_1}^{t_1+T} p_{Load} dt}{\int_{t_1}^{t_1+T} p_s dt}. \quad (20)$$

где  $p_{Load}$  – мгновенная активная мощность нагрузки;  $p_s$  – мгновенная активная мощность источника;

$T$  – период повторяемости кривой мгновенной активной мощности.

В работах кафедры ПБМЭ [20, 31–34] предложен метод расчета максимально возможного и реального КПД пяти базовых систем электроснабжения:

– с постоянным напряжением источника;

- с трехфазным симметричным синусоидальным напряжением источника;
- с трехфазным симметричным синусоидальным напряжением источника и с несимметричной нелинейной нагрузкой;
- с однофазным переменным синусоидальным напряжением источника;
- с однофазным переменным прямоугольным напряжением источника.

Теоретическое исследование и моделирование первых двух из указанных систем электроснабжения позволили получить следующие результаты [32-34]:

– С целью возможности сопоставления различных СЭ по КПД введены понятия полезной активной мощности, равной среднему за период повторяемости  $T$  значению активной мощности нагрузки

$$P_{usf} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p_{Load}(t) dt, \quad (21)$$

и мощности резистивного короткого замыкания

$$P_{sc} = \frac{U_s^2}{R_s}, \quad (22)$$

где  $U_s$  – действующее значение напряжения источника;

$R_s$  – активное сопротивление линии, соединяющей источник и нагрузку.

Вводится также понятие полезного тока нагрузки  $I_{usf}$ , при котором энергия поступает в нагрузку с постоянной скоростью, равной  $P_{usf}$ , и понятие тока резистивного короткого замыкания СЭ.

$$I_{sc} = \frac{U_s}{R_s}. \quad (23)$$

Справедливо соотношение [32]:

$$P_{usf} = U_s \cdot I_{usf} - R_s \cdot I_{usf}^2. \quad (24)$$

Приняв, что коэффициент

$$K_I = \frac{I_{usf}}{I_{sc}}, \quad (25)$$

из [13-16] получим:

$$K_I = \frac{1}{2} - \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{P_{sc}/P_{usf}}}. \quad (26)$$

Соотношение (26) устанавливает зависимость между коэффициентом  $K_I$  и  $P_{sc}/P_{usf}$ , при  $\frac{P_{sc}}{P_{usf}} \geq 4$ .

Мгновенный КПД СЭ с источником постоянного напряжения или с симметричным трехфазным источником синусоидальных напряжений определяется из соотношения:

$$\eta = \frac{U_s \cdot i_{Load}(t) - R_s \cdot i_{Load}^2(t)}{U_s \cdot i_{Load}(t)}. \quad (27)$$

Из (23), (25), (27) получим:

$$\eta = 1 - i_{Load}^*(t) \cdot K_I, \quad (28)$$

где

$$i_{Load}^*(t) = \frac{i_{Load}(t)}{I_{usf}}. \quad (29)$$

Если пульсации тока отсутствуют, то  $i_{Load}^*=1$  и мгновенное значение КПД с учетом (25), (26) и (23) определяется как



$$\eta = \eta_{AV} = \eta_{\max} = 1 - K_I = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{1}{P_{sc}/P_{usf}}}, \quad (30)$$

т. е. работе СЭ с неизменным током нагрузки соответствует максимально возможное значение КПД, однозначно зависящего от отношения мощности короткого замыкания и полезной средней мощности нагрузки. В табл. 1 представлена зависимость значения максимально возможного КПД от отношения  $P_{sc}/P_{usf}$ .

Таблица 1

$\frac{P_{sc}}{P_{usf}}$	4	6	8	10	12	14	18	20	25	30	40	50	60	75	100
$K_I$ по (26)	0,5	0,21 1	0,14 6	0,11 3	0,09 2	0,07 7	0,05 9	0,05 2	0,04 2	0,03 4	0,02 6	0,02	0,01 7	0,01 4	0,01
$\eta_{\max}$ по (30)	0,5	0,78 9	0,85 4	0,88 7	0,90 9	0,92 3	0,94 1	0,94 7	0,95 8	0,96 5	0,97 4	0,98	0,98 3	0,98 6	0,99
$K_I \cong \frac{P_{usf}}{P_{sc}}$	0,25	0,16 7	0,12 5	0,1	0,08 3	0,07 1	0,05 6	0,05	0,04	0,03 3	0,02 5	0,02	0,01 7	0,01 4	0,01

Во второй строке табл. 1 приведены точные значения  $K_I$ , рассчитанные для заданного значения  $P_{sc}/P_{usf}$  по соотношению (26), а в четвертой строке таблицы – приближенные значения  $K_I$ , определяемые по соотношению

$$K_I \cong \frac{P_{usf}}{P_{sc}}. \quad (31)$$

При  $P_{sc}/P_{usf} \geq 10$  точное и приближенное значения  $K_I$  практически совпадают.

Формулы (26) и (30) справедливы для СЭ с источником постоянного напряжения и для СЭ с трехфазным симметричным источником синусоидальных напряжений и резистивной нагрузкой при  $p=P_{usf}=const$ .

В [25], [32] показано, что при наличии в кривой мгновенной активной мощности низкочастотных пульсаций реальный КПД СЭ значительно уменьшается. Табл. 2 иллюстрирует зависимость КПД от параметров  $P_{sc}/P_{usf}$  и от относительного значения амплитуды синусоидальной переменной составляющей в графике мгновенной мощности  $\Delta_I$  в долях полезной мощности.

Как видно из табл. 2 вследствие пульсаций активной мощности КПД может уменьшаться на 5,6 % при  $P_{sc}/P_{usf}=10$  и на 2,6 % при  $P_{sc}/P_{usf}=20$ .

В работе [33] описан метод определения КПД при применении САФ и накопителей энергии в трехфазных четырехпроводных СЭ с симметричной и асимметричной нагрузкой.

Таблица 2

Теоретические реальные значения КПД системы электроснабжения

$\frac{P_{sc}}{P_{usf}}$	4	6	8	10	12	14	18	20	25	30	40	50	60	75	100
$\Delta_I$	0,5	0,211	0,146	0,113	0,092	0,077	0,059	0,052	0,042	0,034	0,026	0,02	0,017	0,014	0,01
0 ( $\eta_{\max}$ )	0,5	0,789	0,854	0,887	0,909	0,923	0,941	0,947	0,958	0,965	0,974	0,98	0,983	0,986	0,99
0,1	–	0,788	0,853	0,886	0,908	0,923	0,941	0,947	0,958	0,965	0,974	0,98	0,983	0,986	0,99
0,25	–	0,789	0,849	0,883	0,905	0,921	0,939	0,946	0,957	0,964	0,973	0,979	0,982	0,986	0,99
0,5	–	0,763	0,836	0,873	0,897	0,913	0,934	0,94	0,953	0,961	0,971	0,978	0,981	0,984	0,989
0,75	–	0,729	0,813	0,855	0,882	0,901	0,924	0,932	0,946	0,955	0,967	0,974	0,978	0,982	0,987
1	–	0,684	0,781	0,831	0,862	0,885	0,912	0,921	0,937	0,948	0,961	0,97	0,975	0,979	0,985

## Практическое применение результатов научно-исследовательских работ Фильтро-компенсирующие устройства

Многофункциональные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) позволяют реализовать комплексный подход к решению проблемы повышения качества электроэнергии питающей сети и соответствия его стандартам. Разрабатываемые за рубежом и в Украине методы и структуры силовых устройств, как правило, реализуют принцип многофункциональности. Однако решение всего комплекса проблем с использованием одного силового блока приводит к ухудшению энергических параметров таких устройств. Поэтому актуальной является разработка силовых схем, выполненных по *m*-канальной структуре с распределением функций контроля отдельных параметров питающей сети и их коррекции по отдельным каналам.

Реализовать в одном устройстве несколько функций позволяет КУВ, силовую схему которого можно представить как двухканальную структуру, состоящую из низкочастотного и высокочастотного каналов. Низкочастотный канал состоит из одного либо двухмостового выпрямителя и предназначен для компенсации средней реактивной мощности питающей сети. Поскольку мост на запираемых тиристорах ВГГ может работать как с опережающими (отрицательными), так и с отстающими (положительными) углами управления, мост на однооперационных тиристорах можно исключить из схемы, а его функции возложить на мост на GTO тиристорах. Высокочастотный канал предназначен для компенсации пульсаций мгновенной реактивной мощности питающей сети (подавления высших гармоник питающей сети, симметрирования токов в фазах трехфазной цепи, подавления токов нулевой последовательности). Такая структура силовой схемы КУВ обеспечивает поддержание на заданном уровне регулируемых параметров в точке подключения фильтрокомпенсирующего устройства к питающей сети и таким образом решает проблему электромагнитной совместимости одного или группы потребителей с питающей сетью.

Потери энергии в силовой схеме фильтрокомпенсирующего устройства минимизируются благодаря, с одной стороны, отсутствию широтно-импульсной модуляции при управлении тиристорными мостами низкочастотного канала КУВ и, с другой стороны, вследствие работы инвертора напряжения высокочастотного канала на токах, значительно меньших номинальных токов питающей сети.

Высокочастотный канал (инвертор напряжения с частотами коммутации выше 10 кГц) и низкочастотный канал (выпрямитель с частотой коммутации 50 Hz) имеют один общий элемент – емкостной накопитель. При выборе величины напряжения на емкостном накопителе следует учитывать максимально возможные значения параметра  $di/dt$  тока питающей сети. Максимальная величина  $di/dt$  определяется коммутационной составляющей тока, потребляемого нагрузкой из питающей сети. Решение задачи коррекции искажений, вносимых компенсированным управляемым выпрямителем в ток питающей сети, упрощается при правильном выборе силового трансформаторного оборудования. Индуктивность вторичной обмотки силового трансформатора выпрямителя и индуктивность вторичной обмотки силового трансформатора инвертора выбираются с учетом взаимного влияния двух каналов на качество электроэнергии питающей сети.

Напряжение на конденсаторе накопителя ограничено снизу условием коммутации GTO тириستоров и равно 1.05 от амплитудного значения линейного напряжения на вторичной обмотке трансформатора выпрямителя. Выбор величины напряжения на конденсаторе накопителя следует выполнять с учетом наличия диапазона, в котором происходит увеличение амплитуды отдельно взятых гармоник и коэффициента гармоник тока сети в целом. Нижняя граница напряжения на конденсаторе накопителя, выбираемая из условия обеспечения допустимого значения коэффициента гармоник тока питающей сети, равна удвоенному амплитудному значению линейного напряжения на вторичной обмотке трансформатора выпрямителя.

Мощность потерь в САФ растет пропорционально частоте переключения силовых транзисторов. Оптимальное значение КПД достигается при частоте коммутации ключей САФ, находящейся в диапазоне от 20 до 30 кГц. Дальнейшее увеличение коммутационной частоты приводит к заметному уменьшению КПД схемы без соответствующего повышения качества электроэнергии питающей сети. Мощность потерь в компенсаторе реактивной мощности (КРМ) уменьшается с ростом напряжения на выходе выпрямителя КРМ. Уменьшение напряжения на нагрузке КРМ в 2 раза приводит к уменьшению мощности потерь в 4 раза при равной величине средней компенсируемой реактивной мощности.

Исследования влияния величины напряжения на конденсаторе накопителя на условия функционирования силового оборудования ФКУ и качество электроэнергии питающей сети позволили сделать вывод о целесообразности учета обратно пропорционального характера зависимости остаточного уровня высших гармоник тока сети и соответственно коммутационных перенапряжений, возникающих при работе моста на полностью управляемых тиристорах, от напряжения на конденсаторе САФ при построении системы управления и регулирования.

Предложена цифровая система управления ФКУ, построенная на основе прогноза состояния системы на следующем такте в канале управления выпрямителем и гистерезисного управления в канале управления инвертором с контуром регулирования коэффициента гармоник тока питающей сети. Основными параметрами, по величине которых можно сделать вывод о эффективности использования предлагаемой структуры ФКУ для улучшения электромагнитной совместимости потребителей электрической энергии с питающей сетью являются коэффициент гармоник тока питающей сети THD, коэффициент мощности полезной нагрузки и ФКУ в точке их подключения к питающей сети  $\chi$ , разность коэффициентов полезного действия полезной нагрузки и полезной нагрузки с ФКУ  $\Delta\eta$ , амплитуда импульсного коммутационного перенапряжения, называемые в дальнейшем показателями качества  $U_k$ . Основное влияние на указанные параметры оказывает уровень напряжения на конденсаторе накопителя ФКУ  $U_c$  и ширина гистерезиса компаратора системы управления ФКУ  $G$ , называемые в дальнейшем варьируемыми параметрами и представляемые вектором  $x=(U_c, G)$ . Показатели качества зависят от варьируемых параметров ФКУ, поэтому их можно представить функциями варьируемых параметров системы, которые определены только в области устойчивости системы автоматического управления и регулирования ФКУ.

Выполнена оптимизация настроечных параметров силовой схемы компенсатора и системы управления. Рекомендовано поддержание напряжения на конденсаторе накопителя на уровне 2,6 от амплитудного значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора низкочастотного канала, гистерезиса в системе управления высокочастотным каналом на уровне 0,005. При указанных настроечных параметрах амплитуда импульса коммутационного перенапряжения не превышает 0,96 от амплитудного значения напряжения на вторичной обмотке трансформатора низкочастотного канала, коэффициент гармоник тока питающей сети не превышает 0,08, коэффициент мощности нагрузки с компенсатором не ниже 0,99, разность коэффициентов полезного действия нагрузки и нагрузки с компенсатором не превышает 0,01.

Многоконтурные системы управления повышают эффективность функционирования ФКУ в целом. Предложены структуры систем управления ФКУ на основе современных микроконтроллеров, обеспечивающие управления двухканальной силовой схемой в едином вычислительном процессе. Разработаны цифровые и аналого-цифровые системы управления ФКУ на основе КУВ, обеспечивающие высокие динамические характеристики ФКУ и высокое качество электрической энергии в точке подключения ФКУ к питающей сети. Цифровая прогнозно-гистерезисная система управления компенсатором реализована на основе процессоров серии TMS. Разработан

пакет управляющих в режиме реального времени программ, обеспечивающих выполнение одного цикла вычислений при управлении высокочастотным каналом за 60  $\mu$ s при длительности одного такта 6.67 ns.

Приведенные выше результаты прошли апробацию при решении задачи улучшения энергетических характеристик формирователей мощных зондирующих импульсов, предназначенных для работы в составе комплексов дистанционного зондирования ионосферы методом некогерентного рассеяния.

Продолжение статьи смотрите в следующем номере.

### Список литературы

1. Akagi H. Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nubae // Int. Power Electronics Conf., Tokyo, Japan, 1983. – P. 1375–1386.
2. Akagi H. Instantaneous re active power compensations comprising switching devices without energy storage components / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IEEE Trans. Ind. Applicat. – May/June, 1984. – Vol. 20. – P. 625 – 630.
3. Akagi H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning / H. Akagi, E.H. Vatanabe, M. // Aredes. IEEE Press / Willy-Interscience. – 2007. – 379 p.
4. Akagi H. Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters / H. Akagi, Y. Tsukamoto, A. Nubae // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1990. – Vol. 26. – P. 93–98.
5. Peng F. Z. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems / F. Z. Peng, J. S. Lai // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1996. – Vol. 45. – no 1. – P. 293–297.
6. Kim H. S. The instantaneous power theory based on mapping matrices in three-phase four-wire systems / H. S. Kim, H. Akagi // In Proc. PCC'97 Conf.voll, Nagaoka, Japan, Aug. 1997. – P. 361–366.
7. Kim H. S. The theory of instantaneous power in three- phase four-wire systems: a comprehensive approach / H.S. Kim, S. Ogasawara, H. Akagi // In. Proc. IEEE/IAS'99' Aunu. Meeting. Oct. 1999. – P. 431–439.
8. Kim H. S. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames / H. S. Kim, H. Akagi // In. Proc. IEEE/PEDS'99 Conf., Hong Kong, July, 1999. – P. 422–427.
9. Kim H. Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory / H. Kim, F. Blaabjerg, B. Bak-Jensen, I. Choi // IEEE Trans. Power Electronics. – 2002. – Vol. 17. – no. 5. – P. 701–710.
10. Aredes M. Comparisons between the p-q and p-q-r theories in three-phase four-wire systems / M. Aredes, H. Akagi, E.H. Watanabe, E.V. Salgado, L.F. Encarnacao // IEEE Trans, on PE. – 2009. – Vol. 24. – no. 4. – P. 924–933.
11. Домнин И. Ф. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах силовой электроники / И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов, Е. И. Сокол // Технічна електродинаміка, тем. випуск, «Проблеми сучасної електротехніки». – 2004. – Ч. 1. – С. 80–91.
12. Жемеров Г. Г. Система составляющих полной мощности и энергетических коэффициентов на основе p-q-r теории мощности / Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка, тем. випуск, «Проблеми сучасної електротехніки». – 2004. – Ч. 6. – С. 69–74.
13. Домнин И.Ф. Определение мгновенных активных и реактивных мощностей в трехфазных электрических сетях с вентильными преобразователями / И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров // «Вісник приазовського державного технічного університету». – Маріуполь. – 2005. – № 15. – С. 70–74.
14. Домнин И. Ф. Компенсация пульсаций мгновенной активной мощности в цепях с резистивной нагрузкой / И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка, тем. випуск, «Проблеми сучасної електротехніки». – 2006.



– Ч. 6. – С. 36–41.

15. Жемеров Г. Г. Энергоэффективность коррекции фазы тока и компенсации пульсаций активной и реактивной мощностей в трехфазной системе электроснабжения / Г. Г. Жемеров, И. Ф. Домнин, О. В. Ильина, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка. – 2007. – №1. – С. 52–57.

16. Жемеров Г. Г. О понятиях «мгновенная активная мощность» и «мгновенная реактивная мощность» / Г. Г. Жемеров, Е. И. Сокол, Н. А. Ильина, О. В. Ильина // Технічна електродинаміка, тем. випуск, «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2007. – Ч. 1. – С. 33–44.

17. Жемеров Г. Г. Накопители энергии компенсаторов пульсаций мгновенной активной мощности / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина // Технічна електродинаміка, тем. випуск, «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2007. – Ч. 3. – С. 23–28.

18. Жемеров Г. Г. Теория мощности Фризе и современные теории мощности / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 6. – С. 63–65.

19. Жемеров Г. Г. Расчет параметров емкостного накопителя энергии компенсатора пульсаций мгновенной активной мощности / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина // Електричество. – 2008. – № 1. – С. 54–59.

20. Жемеров Г. Г. Взаимосвязь между модулем мгновенной реактивной мощности и КПД системы электроснабжения / Г. Г. Жемеров, Н. А. Ильина, О. В. Ильина // Технічна електродинаміка, тем. випуск, «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч. 4. – С. 31–36.

21. Маевский О. А. Энергетические показатели вентильных преобразователей / О. А. Маевский. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.

22. Нейман Л. Р. Теоретические основы электротехники, т. 1 / Л. Р. Нейман, П. О. Демирчан. «Энергия», 1966, Москва-Ленинград, 522 с.

23. Перетворювач змінної напруги в постійну з близьким до одиниці коефіцієнтом потужності (варіанти). Патент на винахід України UA N47631A HO2M7/17, 7/145 пріоритет 30.05 2001, опуб. 15.07 2002 Бюл. № 7.

24. Жемеров Г. Г. Мгновенные и средние активные и реактивные мощности в линейных цепях с синусоидальными напряжениями / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай // Вестник НТУ «ХПИ» «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика». – 2004. – выпуск 43. – С. 135–141.

25. Жемеров Г. Г. Энергосберегающий эффект компенсации пульсаций мгновенной активной мощности / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка, тем. випуск, «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2006. – Ч. 4. – С. 22–27.

26. Жемеров Г. Г. Соотношения для преобразований координат обобщенных векторов напряжений и токов трехфазной системы электроснабжения. Справочное пособие / Г. Г. Жемеров, В. Ю. Колесник, О. В. Ильина // НТУ «ХПИ», Харьков, 2009, 40 с.

27. Жемеров Г. Г. Преобразование координат в электроприводе и силовой электронике / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка, тем. випуск, «Проблеми сучасної електротехніки». – 2006. – Ч. 1. – С. 81–88.

28. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины / А. А. Горев – Государственное энергетическое издательство: Москва, 1950, 551 с.

29. Казовский Е. Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока / Е. Я. Казовский. – Л.: Изд. АН СССР, 1962, 626 с.

30. Ковач К. П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К. П. Ковач, И. Рац. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

31. Жемеров Г. Г. Уменьшение потерь и улучшение качества электроэнергии в системах коммунального электроснабжения / Г. Г. Жемеров, Н. А. Ильина, О. В. Ильина, Д. В. Тугай // Технічна електродинаміка, тем. випуск, «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2008. – Ч. 2. – С. 80–87.



32. Жемеров Г. Г. КПД систем электроснабжения постоянного напряжения и трехфазной симметричной системы синусоидальных напряжений / Г. Г. Жемеров, Н. А. Ильина, О. В. Ильина, О. И. Ковальчук, Е. И. Сокол // Технічна електродинаміка, тем. випуск, «Проблеми сучасної електротехніки», Ч. 2, 2010. – С. 107–118.

33. Жемеров Г. Г. КПД трехфазной четырехпроводной системы электроснабжения с асимметричной нагрузкой / Г. Г. Жемеров, Н. А. Ильина, О. В. Ильина, О. И. Ковальчук, Е. И. Сокол // Технічна електродинаміка, тем. випуск, «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. – Ч. 1, С. 22–31.

34. Жемеров Г. Г. КПД системы электроснабжения однофазного переменного напряжения прямоугольной и синусоидальной формы / Г. Г. Жемеров, О. В. Ильина, О. И. Ковальчук // Технічна електродинаміка, тем. випуск, «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. – Ч. 2, С. 7–15.

35. Жемеров Г. Г. Характеристики управляемого выпрямителя в режиме полной компенсации реактивной мощности / Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов // Електричество. – 2002. – №11. – С. 40–46.

# REVIEW OF SCIENTIFIC DEVELOPMENTS OF THE CHAIR OF INDUSTRIAL AND BIOMEDICAL ELECTRONICS OF THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY "KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE" IN THE FIELD OF ENERGY SAVING AND ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF CONVERSION SYSTEMS (Part 1)

E. I. SOKOL, Doctor of Engineering, G. G. ZHEMEROV, Doctor of Engineering  
I. F. DOMNIN, Doctor of Engineering N. A. ILYINA, Doctor of Engineering  
O. V. ILYINA, Candidate of Engineering, D. S. KRYLOV, Candidate of Engineering  
O. I. KHOLOD, Candidate of Engineering, I. O. LOBACH  
D. V. TUGAY, Candidate of Engineering

*The paper gives a review of main scientific works of the Chair of Industrial and Biomedical Electronics of the NTU "KhPI" in the field of electromagnetic compatibility of conversion systems and energy saving: compensated controlled rectifier, theory of instantaneous active and reactive powers, transformation of coordinates of voltage and current space vectors, calculation of energy losses and efficiency factor in a power supply system and practical application of results of scientific research. This paper presents the first part of the review of scientific works of the chair. Bibl. 35, Fig. 6, Tabl. 2.*

**Key words:** power supply system, efficiency factor, compensated rectifier, power theory, active power filter, active rectifier, compensated asynchronous machine, distributed production of electric power

1. Akagi H. Generalized theory of the instantaneous power in three phase circuits / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nubae // Int. Power Electronics Conf., Tokyo, Japan, 1983. – P. 1375–1386.

2. Akagi H. Instantaneous re active power compensations comprising switching devices without energy storage components / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IEEE Trans. Ind. Applicat. – May/June, 1984. – Vol. 20. – P. 625 – 630.

3. Akagi H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning / H. Akagi, E.H. Vatanabe, M. // Aredes. IEEE Press / Willy–Interscience. – 2007. – 379 p.

4. Akagi H. Analysis and design of an active power filter using quad–series voltage source PWM converters / H. Akagi, Y. Tsukamoto, A. Nubae // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1990. – Vol. 26. – P. 93–98.

5. Peng F.Z. Generalized instantaneous reactive power theory for three–phase power systems / F.Z. Peng, J.S. Lai // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 1996. – Vol. 45. – no 1. – P.

293–297.

6. Kim H.S. The instantaneous power theory based on mapping matrices in three-phase four-wire systems / H.S. Kim, H. Akagi // In Proc. PCC'97 Conf.voll, Nagaoka, Japan, Aug. 1997. – P.361–366.

7. Kim H.S. The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems: a comprehensive approach / H.S. Kim, S. Ogasawara, H. Akagi // In. Proc. IEEE/IAS'99' Annu. Meeting. Oct. 1999. – P. 431–439.

8. Kim H.S. The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames / H.S. Kim, H. Akagi // In. Proc. IEEE/PEDS'99 Conf., Hong Kong, July, 1999. – P. 422–427.

9. Kim H. Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory / H. Kim, F. Blaabjerg, B. Bak-Jensen, I. Choi // IEEE Trans. Power Electronics. – 2002. – Vol. 17. – no. 5. – P. 701–710.

10. Aredes M. Comparisons between the p-q and p-q-r theories in three-phase four-wire systems / M. Aredes, H. Akagi, E.H. Watanabe, E.V. Salgado, L.F. Encarnacao // IEEE Trans, on PE. – 2009. – Vol. 24. – no. 4. – P. 924–933.

11. Domnin I.F. Modern power theories and their use in power electronics converter systems / I.F. Domnin, G.G. Zhemerov, D.S. Krylov, E.I. Sokol // Tehnichna elektrodynamika, "Problemi suchasnoi elektrotehniki". – 2004. – Part 1. – P. 80–91.

12. Zhemerov G.G. The system components of the full power and energy coefficients based on pqr theory of power / G.G. Zhemerov, D.S. Krylov, D.V. Tugay // Tehnichna elektrodynamika "Problemi suchasnoi elektrotehniki". – 2004. – Part 6. – P. 69–74.

13. Domnin I.F. Instant Definition of active and reactive power in three-phase networks with the converter / I.F. Domnin, G.G. Zhemerov // "Visnik priazovskogo derzhavnogo tehnicnogo universitetu". – Mariupol. – 2005. – № 15. – P. 70–74.

14. Domnin I.F. Compensation ripple instantaneous real power in circuits with resistive load / I.F. Domnin, G.G. Zhemerov, O.V. Ilyina, D.V. Tugay // Tehnichna elektrodynamika "Problemi suchasnoi elektrotehniki". – 2006. – Part 6. – P. 36–41.

15. Zhemerov G.G. Energy efficiency correction phase current ripple compensation and active and reactive power in a three phase power supply system / G.G. Zhemerov, I.F. Domnin, O.V. Ilyina, D.V. Tugay // Tehnichna elektrodynamika. – 2007. – № 1. – P. 52–57.

16. Zhemerov G.G. The concepts of "instantaneous active power" and "instantaneous reactive power" / G.G. Zhemerov, E.I. Sokol, N.A. Ilyina, O.V. Ilyina // Tehnichna elektrodynamika "Silova elektronika i energoefektivnist". – 2007. – Part 1. – P. 33–44.

17. Zhemerov G.G. Energy storage expansion joints pulsation instantaneous real power / G.G. Zhemerov, O.V. Ilyina // Tehnichna elektrodynamika "Silova elektronika i energoefektivnist". – 2007. – Part 3. – P. 23–28.

18. Zhemerov G.G. The theory of power Frieese and modern theories of power / G.G. Zhemerov, O.V. Ilyina // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2007. – № 6. – P. 63–65.

19. Zhemerov G.G. Calculation of parameters of capacitive energy storage pulsation instantaneous real power / G.G. Zhemerov, O.V. Ilyina // Electrichestvo. – 2008. – № 1. – P. 54–59.

20. Zhemerov G.G. The relationship between the modulus of the instantaneous reactive power and efficiency of the electricity system / G.G. Zhemerov, N.A. Ilyina, O.V. Ilyina // Tehnichna elektrodynamika "Silova elektronika i energoefektivnist". – 2008. – Part 4. – P. 31–36.

21. Majewski O.A. Energy performance rectifier converters / O. Majewski. – Moscow: Energiya, 1978. – 320 P.

22. Neiman L.R. Theory of Electrical Engineering, Vol. 1 / L.R. Neumann, P.O. Demirchian. "Energy", 1966, Moscow–Leningrad, 522 P.

23. Peretvoryuvach zminnoi naprugi v postiyu s blizkim to odinitsi koefitsientom potuzhnosti (varianti). The patent for vinahid of Ukraine UA N47631A HO2M7/17, 7/145 prioritet 30.05.2001, pub. 15.07.2002 Bull. Number 7.

24. Zhemerov G.G. Instantaneous and average active and reactive power in linear circuits with sinusoidal voltage / G.G. Zhemerov, D.V. Tugay // *Vesnik NTU "KhPI" "Problemi avtomatizirovannoho elektroprivoda. Teoriya i praktika"*. – 2004. – Issue 43. – P. 135–141.
25. Zhemerov G.G. Energy-saving effect of compensation ripple instantaneous real power / G.G. Zhemerov, O.V. Ilyin, D.V. Tugay // *Tekhnichna elektrodynamika "Silova elektronika i energoefektivnist"*. – 2006. – Part 4. – P. 22–27.
26. Zhemerov G.G. Relations for the coordinate transformations of generalized vectors of voltages and currents of three-phase power supply system. A guidebook / G.G. Zhemerov, V.Y. Kolesnik, O.V. Ilyina // *NTU "KhPI"*, Kharkov, 2009, 40 P.
27. Zhemerov G.G. Coordinate transformation in the electric drive and power electronics / G.G. Zhemerov, O.V. Ilyina, D.V. Tugay // *Tekhnichna elektrodynamika "Problemi suchasnoi elektrotehniki"*. – 2006. – Part 1. – P. 81–88.
28. Gorev A.A. Transients synchronous machine / A.A. Gorev – State Energy Publishers: Moscow, 1950, 551 C.
29. Kazovsky E.Y. Transients in electrical machines AC / E.Y. Kazovsky. – Leningrad: Academy of Sciences of the USSR, 1962, 626 P.
30. Kovacs K.P. Transients in machines AC / K.P. Kovacs, J. Raz. – Leningrad: Gosenergoizdat, 1963. – 744 P.
31. Zhemerov G.G. Reducing waste and improving the quality of electricity supply in the systems your Utility / G.G. Zhemerov, N.A. Ilyina, O.V. Ilyina, D.V. Tugay // *Tekhnichna elektrodynamika "Silova elektronika i energoefektivnist"*. – 2008. – Part 2. – P. 80–87.
32. Zhemerov G.G. Efficiency of DC power supply systems and symmetrical three-phase system of sinusoidal voltage / G.G. Zhemerov, N.A. Ilyina, O.V. Ilyina, O.I. Kovalchuk, E.I. Sokol // *Tekhnichna elektrodynamika "Problemi suchasnoi elektrotehniki"*. – 2010. – Part 2. – P. 107–118.
33. Zhemerov G.G. Efficiency three-phase four-wire power supply system with an asymmetric load / G.G. Zhemerov, N.A. Ilyina, O.V. Ilyina, O.I. Kovalchuk, E.I. Sokol // *Tekhnichna elektrodynamika "Silova elektronika i energoefektivnist"*. – 2010. – Part 1. – P. 22–31.
34. Zhemerov G.G. Efficiency of single-phase AC power system voltage rectangular and sinusoidal / G.G. Zhemerov, O.V. Ilyina, O.I. Kovalchuk // *Tekhnichna elektrodynamika "Silova elektronika i energoefektivnist"*. – 2010. – Part 2. – P. 7–15.

Поступила в редакцию 02.10 2013 г.